

SURVIE ET CROISSANCE DE MINI-PLANTS D'ÉPINETTE NOIRE REBOISÉS EN FORÊT BORÉALE : BILAN DE 10 ANS EN PLANTATION

Par

**Denis Walsh
Jacques Allaire
Daniel Lord**



Consortium de
recherche sur la
forêt boréale commerciale

mars 2011



Université du Québec à Chicoutimi

Ce document est disponible en format PDF à l'adresse suivante : <http://dsf.uqac.ca/boreale/>
© Consortium de recherche sur la Forêt Boréale Commerciale, 2011.

Le contenu de ce document peut être reproduit en autant que la source soit mentionnée.

Université du Québec à Chicoutimi

Partenaire du Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale

Département des Sciences fondamentales

a/s Daniel Lord

555, boulevard de l'Université

Chicoutimi, Québec, G7H 2B1

Tél : 418-545-5011, poste 5064; Télécopieur : 418-545-5012

courrier électronique : Daniel_Lord@uqac.ca

TITRE :

**SURVIE ET CROISSANCE DE MINI-PLANTS D'ÉPINETTE NOIRE REBOISÉS EN FORÊT
BORÉALE : BILAN DE 10 ANS EN PLANTATION**

Par :

Denis Walsh, M.Sc.
Jacques Allaire, agr.
Daniel Lord, PhD, professeur
Université du Québec à Chicoutimi
Département des Sciences fondamentales
555, boulevard Université
Chicoutimi, Québec. G7H 2B1

Collaborateur :

Jean-Pierre Girard,
Agent de recherche et de planification socioéconomique
Responsable régional de la production des semences et des plants
Direction des opérations intégrées du Saguenay - Lac-St-Jean
Ministère des Ressources naturelles et de la Faune

**Université du Québec à Chicoutimi
et
Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale**

MARS 2011

REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par le Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, direction régionale du Saguenay-Lac-St-Jean. Les auteurs sont redevables en premier lieu à M. Jean-Pierre Girard du Ministère des Ressources naturelles (MRNF) région 02 qui a eu l'idée initiale d'utiliser les récipients IPL-126-25 pour la production de semis d'épinette noire de type PPD et dont la collaboration et son support ont été indéfectibles tout au long du projet. Nous adressons aussi des remerciements à Daniel Gagnon, technicien horticole à l'U.Q.A.C. qui était responsable de la production des semis en pépinière ainsi qu'à Martin Jean, Éric Gagnon, Guillaume Dallaire, Karine Ledoux, Ann Bouchard, Sébastien Audet tous étudiants en biologie à l'U.Q.A.C. et à Patrick Nadeau, technicien à l'U.Q.A.C. pour leur participation à la réalisation de différentes étapes du projet de recherche.

RÉSUMÉ

Cette étude compare la survie et la croissance en plantation des semis d'épinette noire cultivés dans des récipients de 126 cavités contenant chacune 15 et 25 cm³ de substrat avec des plants conventionnels utilisés couramment au Québec, soit des récipients de 67 cavités de 50 cm³ et de 45 cavités de 110 cm³. L'objectif est de valider l'idée que des plants de plus petites dimensions que les plants produits conventionnellement pouvaient être utilisés pour le reboisement dans les territoires nordiques de la forêt boréale québécoise où la végétation de compétition est peu présente. L'effet de la date de plantation a aussi été testé. Les plants ont été reboisés dans le domaine de la pessière noire de la forêt boréale près du 50ième parallèle, province de Québec, Canada. Le site a fait l'objet d'une coupe totale en 1994, a été scarifié en 1997 et reboisé en 1998. Cinq lots comprenant des plants cultivés dans des récipients possédant des cavités de 15, 25, 50 et 110 cm³ ont été mis en terre en mai, juin, juillet, août et septembre 1998 selon un plan factoriel par bloc en tirage. Au moment de la plantation, les plants produits en récipient de 15 et 25 cm³ mesuraient 12 cm comparativement à 18 cm pour les 50 cm³ et 28 cm pour les 110 cm³. Après 10 ans en plantation, le taux de survie des plants produits en récipients de 15 et 25 cm³ (mini-plants) était de 91% comparativement à 96% pour les plants conventionnels. Les taux relatifs de croissance en hauteur, en poids sec et les concentrations foliaires en azote, phosphore et potassium des mini-plants étaient similaires aux plants conventionnels. La date de plantation a eu un effet sur l'ensemble des plants et non sur un type en particulier. Les plantations de septembre montraient un retard significatif même après dix années de croissance en plantation. En conclusion, la plantation de mini-plants a répondu aussi bien en terme de survie et de croissance que la plantation de plants conventionnels. Les plants produits en récipients de 15 et 25 cm³ pourraient donc remplacer avec succès les plants conventionnels (récipient 50 cm³ ou 110 cm³) là où il y a peu de végétation de compétition, ce qui pourrait entraîner des économies sur les coûts de production, de transport et de mise en terre.

Mots-clés : plantation, survie, croissance, épinette noire, dimension des plants, mini-plant, plant de petite dimension, forêt boréale.

ABSTRACT

Survival and growth in plantation of seedlings of black spruce grown in containers of 126 cavities each containing 15 or 25 cm³ growing media are compared with conventional seedlings grown in containers of 50 cm³ and 110 cm³ cavities. The objective is to validate the idea that seedlings of small dimensions could be used for reforestation in the northern territories of the forest boreal Quebec where the vegetation of competition is not present. The effect of planting date has also been tested. Seedlings were planted in the black spruce boreal forest, near the 50th parallel. The site has been cut in 1994, scarified in 1997 and reforested in 1998. Five lots comprising plants grown in containers with 15, 25, 50 and 110 cm³ cavities have been planted in may, june, july, august and september 1998 in a block split-plot factorial design. Seedlings in of 15 and 25 cm³ container were 12 cm high compared to 18 for 50 cm³ and 28 cm to 110 cm³. After 10 years in plantation, the mini-seedlings survival rate was 91% compared to 96% for conventional seedlings. The mini-seedlings relative growth rates, leaf nitrogen, phosphorus and potassium concentrations were similar to conventional seedlings. Date of planting had an effect on all of the seedlings and not on a particular type. Plantation of september showed a significant delay even after ten years of growth. In conclusion, the plantation of mini-seedlings responded as well in terms of survival and growth that the planting of conventional seedlings. Plants in containers of 15 and 25 cm³ could replace conventional plants (container 50 cm³ or 110 cm³) successfully where vegetation competition is insignificant, which could lead to savings on production costs.

Keywords: plantation, survival, growth, black spruce, dimension of plants, mini-seedling, boreal forest.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iii
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT.....	vii
TABLE DES MATIÈRES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES FIGURES.....	xii
INTRODUCTION.....	1
MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	2
Production des plants.....	2
Localisation.....	3
Dispositif expérimental.....	4
Échantillonnages.....	5
Analyses statistiques.....	5
RÉSULTATS.....	5
Conditions climatiques du site de plantation.....	5
Survie.....	5
Croissance en hauteur.....	6
Croissance en diamètre.....	8
Croissance de la biomasse.....	8
Racines adventives.....	11
Teneur foliaire en éléments nutritifs.....	11
DISCUSSION.....	11
Taux de survie.....	11
Croissance en hauteur et en diamètre de la tige.....	13
Croissance de la biomasse.....	14
Statut nutritif.....	14
CONCLUSION.....	15
RÉFÉRENCES.....	15

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques morphologiques des quatres types de plants en récipient au moment de la plantation (moyenne \pm erreur-type, n = 50).....	2
Tableau 2. Analyse de variance du pourcentage de survie des plants.....	6
Tableau 3. Analyse de variance de la hauteur et du diamètre de la tige des plants (transformés en log naturel).....	7
Tableau 4. Analyses de variance de la masse sèche de la partie aérienne et racinaire des plants (transformées en Log naturel) après respectivement six et quatre ans en plantation.....	9
Tableau 5. Analyse de variance du pourcentage de racines adventives.....	11
Tableau 6. Analyses de variance du contenu foliaire en minéraux.....	12

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schéma d'une cavité d'un récipient 126-15 et 126-25.....	3
Figure 2. Caractéristiques des quatre types de récipients utilisés dans cette expérience. Les informations sur les récipients IPL 45-110 proviennent de Gingras et Richard (1999).....	3
Figure 3. Calendrier de production des différents types de plants prévus pour les différentes dates de plantation.....	4
Figure 4. Localisation du site de plantation effectué dans le secteur du lac Henry en 1998. La zone en gris délimite l'unité d'aménagement 27-02.....	4
Figure 5. Relevés des températures maximales et minimales de même que des précipitations journalières enregistrées durant l'année de la plantation.....	6
Figure 6. Pourcentage de survie des différents types de plants. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$	6
Figure 7. Pourcentage de survie des plants en fonction des différentes dates de plantation. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$	6
Figure 8. Croissance en hauteur des différents types de plant. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$	7
Figure 9. Croissance en hauteur des plants en fonction des différentes dates de plantation. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$	7
Figure 10. Croissance en diamètre des différents types de plant. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$	8
Figure 11. Croissance en diamètre des plants en fonction des différentes dates de plantation. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$	8
Figure 12. Croissance de la masse sèche de la tige des différents types de plant. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$	8
Figure 13. Croissance de la masse sèche de la tige des plants en fonction des différentes dates de plantation. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$	8
Figure 14. Croissance de la masse sèche racinaire des différents types de plant. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$	9
Figure 15. Croissance de la masse sèche racinaire des plants en fonction des différentes dates de plantation. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$	9

Figure 16. Variation annuelle de la masse sèche de la tige des plants
(transformation en Log naturel) ainsi que le taux relatif de croissance (TRC)
en fonction des différents types de plant (A) et des différentes dates de plantation.....10

Figure 17. Variation annuelle de la masse sèche racinaire des plants (transformation
en Log naturel) ainsi que le taux relatif de croissance (TRC) en fonction des différents
types de plant (A) et des différentes dates de plantation.....10

Figure 18. Pourcentage de racines adventives des différents types de plants.
Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.
Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences
significatives à $p < 0,05$11

Figure 19. Variation des concentrations foliaires en N, P et K en fonction (A)
des différents types de plant et (B) des différentes dates de plantation. Les
moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences
significatives à $p < 0,05$13

INTRODUCTION

Les grandes forêts fermées d'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.) d'un seul tenant sont caractéristiques de la forêt boréale commerciale de l'Est du Canada. Les peuplements y sont récoltés en majorité selon les modalités d'une coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS) qui visent à protéger et à utiliser la régénération préétablie pour renouveler les pessières coupées. Lorsque la régénération préétablie est jugée insuffisante, la plantation devient alors le principal outil d'aménagement pour assurer le renouvellement de la forêt fermée (MRN 2002). La majorité des quelques 63,2 millions¹ de plants d'épinette noire reboisés annuellement au Québec ont été mis en terre dans les grandes forêts nordiques du domaine de l'état situées entre 200 et 500 km au nord des pépinières productrices de plants forestiers (MRNF 2010).

Le choix de la dimension du plant à reboiser est fait en fonction des risques associés à l'envahissement de la station par les espèces de compétition (Thiffault *et al.* 2003). Il est en effet reconnu que les semis qui sont capables de surpasser en hauteur la végétation de compétition dès les premières années suivant la plantation sont plus susceptibles de s'établir avec succès (Scarrat 1982). C'est ainsi que les plants de fortes dimensions (PFD) produits dans des récipients avec cavités individuelles de plus de 300 cm³ sont utilisés comme une solution alternative à l'épandage de phytocides dans les sites où la concurrence végétale est forte (Lamhamedi *et al.* 2003). Dans les régions les plus nordiques de la forêt boréale commerciale, la végétation de compétition est surtout composée d'éricacées et d'herbacées de moins d'un mètre de hauteur. Dans les plantations d'épinette noire, cette végétation exerce plutôt une compétition pour les éléments nutritifs (Inderjit et Mallik 2002; Yamasaki *et al.* 1998; 2002). Le scarifiage permet de diminuer efficacement pendant les trois premières années le recouvrement des éricacées (*Kalmia*, *Ledum* sp.) tout en améliorant les conditions d'installation du plant (Prévost 1996; 1997; Thiffault *et al.* 2003).

En général, les plants reboisés en territoire nordique québécois sont de petites dimensions, soit de 20 à 40 cm de hauteur, environ. Ils sont produits le plus souvent sur deux saisons de croissance en récipients de 45 cavités de 110 cm³ chacune ou de 67 cavités de 50 cm³ chacune. Le plant passera le premier hiver en récipient à la pépinière. Cette longue période en résidence chez le pépiniériste pour des plants de cette dimension influe nécessairement sur les coûts de production. De plus, pour des espèces sensibles aux déformations racinaires, il est préférable de réduire au minimum le temps

de résidence en récipient (Salonius *et al.* 2000).

En somme, les conditions de faible compétition et d'éloignement de ces sites nordiques rend pertinente l'idée de produire et de planter dans la même année des plants de plus petites dimensions que ceux produits sur deux ans en cavité de 110 ou de 50 cm³, surtout si le nombre de plants produits par unité de surface augmente significativement. Réussir ceci sans modifier les autres paramètres entourant l'opération plantation pourrait abaisser les coûts globaux de reboisement à l'hectare, tant par la réduction des coûts de production des plant en pépinière que par celle des coûts de transport vers les sites de plantation et des coûts de la plantation proprement dite.

Des plantations ont déjà été réalisées avec des plants de très petites dimensions de type Walters Bullets dont le volume de cavité était de 22 cm³; la survie des sapins Douglas et des pins Lodgepole se comparaient avantageusement aux plants conventionnels produits en récipients de 40 cm³ (Gardner 1982). De même, Sutherland et Day (1988) n'ont pas vu de corrélation entre la taille du récipient (35 à 157 cm³) et le taux de survie des épinettes noires. Des mini-plants cultivés dans des cavités de 10-20 cm³ sont aussi utilisés à petite échelle en Suède, ce type de plant étant moins affecté par le charançon du pin (*Hylobius abietis* L.) que les plants conventionnels (Lindstrom *et al.* 2005). Johansson *et al.* (2007) indiquent cependant que les mini-plants sont plus sensibles au déchaussement par le gel et à la compétition. D'autres ont aussi affirmé que les semis de plus grande taille sont généralement plus résistants au gel que ceux de petite taille (Krasowski et Simpson 2001). Mais il semblerait que le facteur le plus important soit la qualité du lot de plant. Les plants qui sont bien endurcis peuvent en effet maintenir leur potentiel photosynthétique, leur conductance stomatale et leur capacité de croissance racinaire à des températures basses même après un épisode de gel (Grossnickle et Folk 1993).

L'utilisation d'un traitement de jours courts est une pratique qui est parfois appliquée quelques semaines avant la livraison des plants sur le site de reboisement; l'arrêt de l'élongation et la formation du bourgeon apical permet l'endurcissement du plant qui s'acclimate mieux aux conditions environnementales du site (Grossnickle 2000). Certaines études remettent cependant en question l'effet positif du traitement de jours courts d'une durée de dix jours et plus sur le taux de survie et la croissance en plantation (Tan *et al.* 2008).

La courte période sans gel limite la durée de la saison de plantation dans la portion nordique de la forêt boréale commerciale caractérisée par une faible végéta-

¹ : moyenne des années 2007-2008 (MNRF 2010).

tion de compétition. Le climat y étant plus rigoureux, la fenêtre temporelle visée par les gestionnaires forestiers s'étend de préférence entre le début juin et la fin août. Plus tôt, la fréquence élevée des gels tardifs sous ces latitudes causerait un préjudice aux plants reboisés. De plus, les conditions opérationnelles sont défavorables puisque les sols sont encore fortement gorgés d'eau de fonte. Plus tard, les basses températures automnales limiteraient la croissance racinaire et les plants reboisés seraient plus susceptibles au dessèchement à cause du faible contact entre les racines et le sol, ce qui réduit l'absorption de l'eau (Paterson *et al.* 2001). Un ancrage déficient du plant peut aussi causer une forte mortalité et des déformations de la tige (Goulet 1995). D'après Paterson *et al.* (2001), les conditions idéales de plantation devraient se situer entre 5° à 15° C et une humidité relative de plus de 30%.

Dans cette étude, nous présentons les résultats de dix années de croissance en plantation de mini-plants produits en une seule saison de croissance dans des récipients de 126 cavités de 15 et de 25 cm³. Ils sont comparés aux plants produits dans les récipients conventionnels de 50 et 110 cm³ par cavité. L'hypothèse testée est la suivante : la survie et le taux relatif de croissance des mini-plants produits en récipients de 15 et 25 cm³ sont comparables à ceux produits en récipients conventionnels de 50 et 110 cm³ sous des conditions identiques de climat et de préparation de terrain. Connaissant les conditions climatiques relativement froides caractérisant les secteurs visés et sachant que le gel pourrait être le facteur limitant l'emploi de mini-plants, la période de plantation a été étendue plus tard à l'automne que ce qui est normalement prescrit sous ces latitudes.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Production des plants

Les plants ont tous été produits en serre sur le campus de l'Université du Québec à Chicoutimi (48°25'N, 71°04'O). Les mini-plants ont été produits à raison de 1 658 plants.m⁻² dans des récipients de 126 cavités dont le volume était de 15 (126-15) ou 25 cm³ (126-25). Le récipient de 15 cm³ est en fait un récipient de 25 cm³ qui a été sectionné pour obtenir une cavité de 15 cm³ (figure 1). Le récipient de 25 cm³ était utilisé antérieurement pour le repiquage des plants à racines nues (J.-P. Girard, communication personnelle). Des plants produits dans les récipients conventionnels (Conv) de 67 cavités de 50 cm³ (67-50) ou de 45 cavités de 110 cm³ (45-110) ont été utilisés comme témoin dans cette expérience, la densité de production étant respectivement de 852 et 572 plants.m⁻² (figure 2).

La régie de culture était planifiée de façon à obtenir des plants qui étaient en dormance et d'une hauteur similaire pour le même type de récipient au moment de chaque date de plantation. Le tableau 1 présente les caractéristiques des plants produits dans les quatre types de récipients. Les graines d'épinette noire utilisées pour toutes les cultures provenaient d'un verger à graines du Ministère des Ressources naturelles du Québec (EPN-V8-025-K13-026-96). Au moins trois graines étaient semées dans les cavités remplies de tourbe horticole et recouverte de silice. Une éclaircie a été faite après 5 semaines de culture pour ne laisser qu'une plantule par cavité. Les semis étaient fertilisés toutes les semaines en utilisant une solution Hoagland (Epstein 1972) contenant 224 ppm N, 62 ppm P, et 235 ppm K. Les plants ont été cultivés à une température de 20-25°C le jour et 15-20°C la nuit avec une photopériode de 18 heures jusqu'au traitement de jour-court. Celui-ci durait deux

Tableau 1. Caractéristiques morphologiques des quatres types de plants en récipient au moment de la plantation (moyenne ± erreur-type, n = 50).

Type de récipient	126-15	126-25	67-50	45-110
Volume de l'alvéole (cm ³)	15	25	50	110
Semis/m ²	1658	1658	852	572
Hauteur (cm)	12,12 ± 0,23	12,70 ± 0,31	17,79 ± 0,39	28,08 ± 0,63
Diamètre au collet (mm)	1,36 ± 0,03	1,39 ± 0,03	1,81 ± 0,04	2,72 ± 0,06
Masse sèche de la cime (mg)	292 ± 9	254 ± 8	568 ± 25	1514 ± 63
Masse sèche racinaire(mg)	128 ± 6	132 ± 5	345 ± 16	603 ± 31
Rapport masse cime :				
racines	2,51 ± 0,13	2,03 ± 0,08	1,69 ± 0,05	2,72 ± 0,13
[N] foliaire (%)	0,85 ± 0,01	0,92 ± 0,01	1,04 ± 0,01	1,15 ± 0,01
[P] foliaire (%)	0,21 ± 0,00	0,22 ± 0,00	0,27 ± 0,00	0,28 ± 0,00
[K] foliaire (%)	0,86 ± 0,01	0,83 ± 0,01	0,91 ± 0,01	0,96 ± 0,01

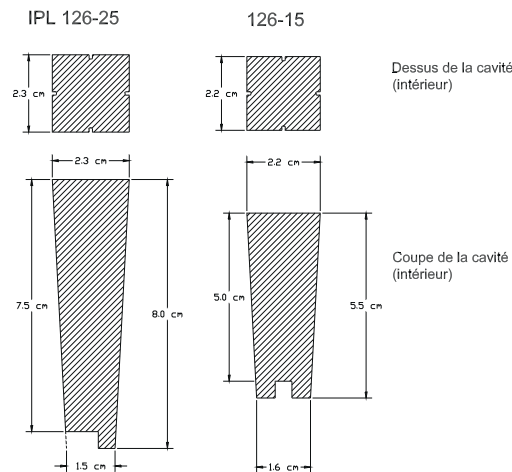


Figure 1. Schéma d'une cavité d'un récipient 126-15 et 126-25.

126-15 (IPL Inc.) Longueur : 34,3 cm Largeur : 22,2 cm Profondeur : 5,5 cm Surface : 0,076 m ² Matériaux : Polyéthylène haute densité Nombre de cavités : 126 Diamètre de la cavité : --- Côté de la cavité : 2,2 cm Volume de la cavité : 15 cm ³ Plants au m ² : 1 658 Efficacité des arrosages : nd	
126-25 (IPL Inc.) Longueur : 34,3 cm Largeur : 22,2 cm Profondeur : 8,0 cm Surface : 0,076 m ² Matériaux : Polyéthylène haute densité Nombre de cavités : 126 Diamètre de la cavité : --- Côté de la cavité : 2,3 cm Volume de la cavité : 25 cm ³ Plants au m ² : 1 658 Efficacité des arrosages : nd	
67-50 (IPL Inc.) Longueur : 35,4 cm Largeur : 22,2 cm Profondeur : 9,0 cm Surface : 0,078 m ² Matériaux : Polyéthylène haute densité Nombre de cavités : 67 Diamètre de la cavité : 3,2 cm Côté de la cavité : --- Volume de la cavité : 50 cm ³ Plants au m ² : 852 Efficacité des arrosages : nd	
45-110 (IPL Inc.) Longueur : 35,4 cm Largeur : 22,2 cm Profondeur : 12,5 cm Surface : 0,078 m ² Matériaux : Polyéthylène haute densité Nombre de cavités : 45 Diamètre de la cavité : 3,9 cm Côté de la cavité : --- Volume de la cavité : 110 cm ³ Plants au m ² : 572 Efficacité des arrosages : 0,930	

Figure 2. Caractéristiques des quatre types de récipients utilisés dans cette expérience. Les informations sur les récipients IPL 45-110 proviennent de Gingras et Richard (1999).

semaines et consistait à diminuer la photopériode à 8 heures et à interrompre la fertilisation durant deux semaines (Bigras et D'Aoust 1992). Durant la période d'endurcissement ultérieure, les semis étaient fertilisés toutes les semaines avec une solution de 100 ppm N, 140 ppm P, et 235 ppm K. La figure 3 illustre les différentes régies de production pour les quatre types de plants et les cinq dates de plantation.

Les détails de la production des plants sont donnés dans Walsh *et al.* (2002). Brièvement, les mini-plants de 126-15 et 126-25 ont été produits en 18 semaines : 10 semaines de croissance en hauteur de la tige, deux semaines de traitement de jour-court et six semaines d'endurcissement (10+2+6). Contrairement aux productions commerciales étalées sur deux ans, les plants de 67-50 ont aussi été produits dans la même année, soit en 24 semaines (14+2+8). Les plants de 45-110 ont été produits en deux saisons de croissance. Les récipients 110 cm³ ont été ensemencés le 20 mai 1997 et ont été cultivés en serre jusqu'à la fin juillet puis ont eu un traitement de jour-court de deux semaines pour ensuite être transférés sur une aire de croissance extérieure durant la période d'août à octobre. Les plants ont ensuite été entreposés dans un tunnel chauffé à une température variant entre 0°C et 5°C durant l'hiver ou entreposés à l'extérieur selon la date de plantation (figure 3). Au printemps 1998, trois lots ont été formés (un pour chaque date de plantation de mai, juin et juillet); chaque lot était transféré en serre pour terminer leur croissance fixée à environ 25 cm de hauteur moyenne de la tige. Un traitement de jour-court était appliqué pendant deux semaines et les plants étaient endurcis comme décrit plus haut. Les lots de plants 45-110 qui ont été plantés en août et septembre ont terminer leur deuxième année de croissance sur l'aire extérieur.

Localisation

L'étude a été réalisée à plus de 125 Km au nord du Lac-St-Jean, province de Québec, Canada (49°59'N, 71°56'O), dans le sous-domaine bioclimatique de la pessière à mousses de l'Est, sous-région écologique 6-h-T (Saucier *et al.* 2009) (figure 4). Le climat régional est de type subpolaire subhumide continental, caractérisé par une très courte saison de croissance. Les précipitations estivales sont en moyenne de 946 mm. La température annuelle moyenne est de -1.8°C, le nombre de jours sans gel de 134 et le nombre moyen de degrés-jours au dessus de 5°C est de 971 (Environnement Canada 2011). En 1998, les données climatiques ont été recueillies à une station météorologique temporaire (49°58'56"N, 71°30'26"O) situé à 50 km à l'ouest du site de plantation.

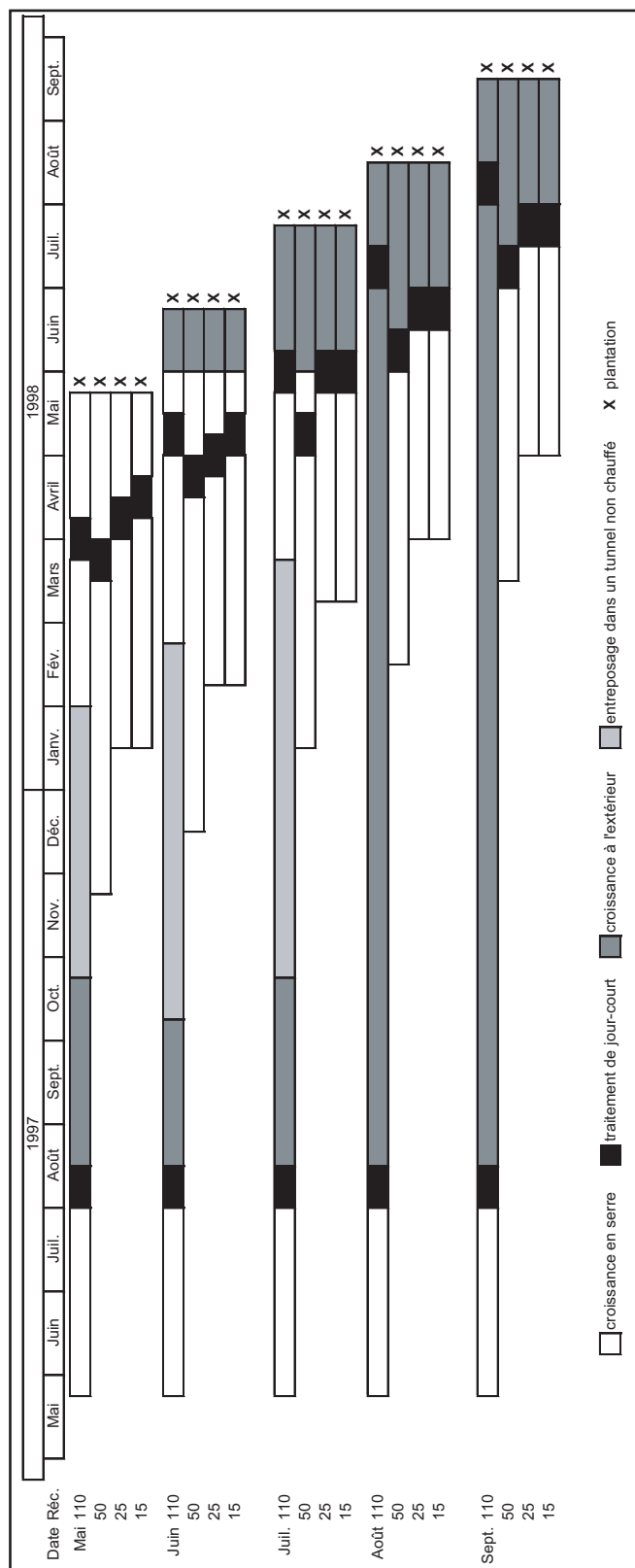


Figure 3. Calendrier de production des différents types de plants prévus pour les différentes dates de plantation.

Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental comprenait cinq blocs; trois blocs étaient localisés sur un till indifférencié bien drainé où le peuplement d'épinette noire de plus de 90 ans a été récolté en 1994 par la méthode de coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS), tandis que les deux autres étaient situés sur une terrasse sablonneuse fluvioglacière bien drainée où le peuplement mixte d'épinette noire et de pin gris a fait l'objet d'une coupe totale en 1994. Les parterres de coupe ont été scarifiés en 1997 en utilisant un scarificateur de type Delta à disques espacés de deux mètres. Chaque bloc comprenait les quatre types de plants (cavités de 15, 25, 50 et 110 cm³) combinés à cinq dates de plantation (25 au 28 mai, 22 au 25 juin, 20 au 23 juillet, 17 au 20 août, 14 au 17 septembre 1998). Chaque unité expérimentale formait une parcelle de 40 x 40 m comprenant 400 plants espacés à tous les 2 mètres. Il est à noter

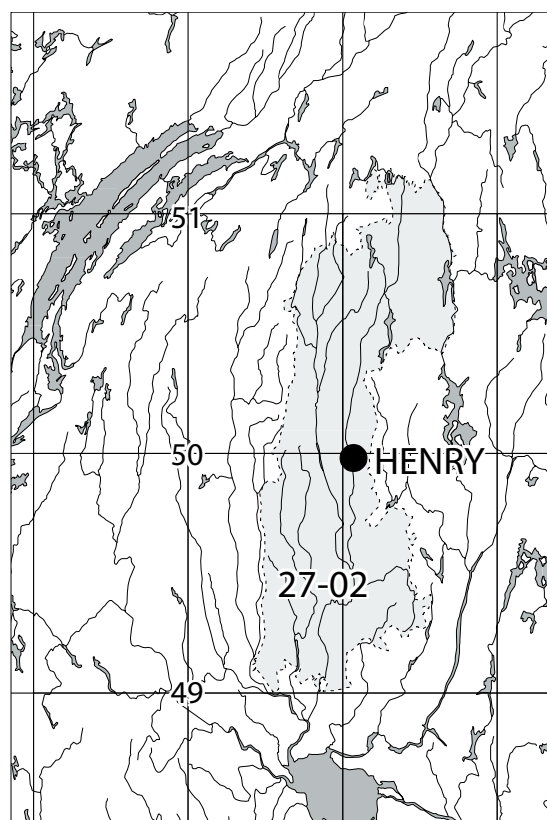


Figure 4. Localisation du site de plantation effectué dans le secteur du lac Henry en 1998. La zone en gris délimite l'unité d'aménagement 27-02.

que la plantation du mois de septembre n'est généralement pas prescrite sous ses latitudes, alors que celle de la fin-mai est conditionnelle à des conditions terrains suffisamment sèches pour opérer, ce qui fut le cas en 1998.

Échantillonnages

Un échantillonnage comprenant cinq plants sélectionnés aléatoirement dans chaque parcelle a été réalisé au début du mois de septembre ou d'octobre correspondant à la 2^{ème}, 3^{ème}, 4^{ème}, 6^{ème} et 10^{ème} année en plantation. Les plants échantillonnés ont été ramenés au laboratoire et la hauteur totale ainsi que le diamètre au niveau du collet de la tige ont été mesurés. Les racines ont été délavées délicatement et les biomasses sèches de la cime et des racines ont été déterminées séparément sur chacun des semis après séchage à l'étuve à 65°C pendant 48 heures. La biomasse sèche de la cime a été déterminée pour les années 2, 3, 4 et 6, alors que l'année 6 n'a pas été retenue pour la biomasse sèche des racines; l'extension des racines à la sixième année de croissance était trop importante pour obtenir une donnée aussi précise de leur biomasse que celle obtenue lors des quatre échantillonnages précédents. Les aiguilles des pousses annuelles des cinq plants récoltées ont été prélevées et combinées par parcelle. Le contenu en N, P, K, Ca et Mg a été analysé par un laboratoire certifié (Direction de la recherche forestière, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Québec). Dans chaque parcelle, 100 plants répartis aléatoirement ont été localisés précisément au moment de la plantation. Ce sont toujours ces mêmes 100 plants qui ont servi à mesurer le taux de survie en notant l'état des plants (mort ou vivant).

Le cinquième échantillonnage qui a été réalisé à la fin septembre 2007 n'a été fait que sur les trois blocs localisés sur till indifférencié, les deux blocs situés sur une terrasse sablonneuse fluvioglacière bien drainée ayant brûlé lors des grands feux de juin 2007 qui ont affecté ce territoire. Le système racinaire a été excavé et le nombre de racines adventives (localisées au dessus du collet) a été déterminé.

Analyses statistiques

Le taux de survie (%) et les variables de croissance ont été analysés selon un plan factoriel en blocs complets sub-divisés en utilisant la procédure REML de l'analyse de variance du logiciel JMP vs 8.0.2 (SAS Institute Inc. 2009). L'effet bloc est considéré comme un facteur aléatoire. Les combinaisons Blocs x Type de récipients x date de plantation (B x R x D) définissent les parcelles principales tandis que l'année de croissance en plantation (A) en interaction avec les facteurs précédents définissent les sous-parcelles (Quinn et Keough 2002). L'erreur résiduelle des parcelles principale correspond à l'interaction B x P x D tandis que l'interaction B x A x P x D correspond à l'erreur résiduelle des sous-parcelles, les interaction B x A, B x A x P, B x A x D étant confon-

dues avec la première (Sit 1995). L'hétéroscédasticité et la normalité des résidus ont été vérifiées graphiquement en examinant la dispersion des valeurs résiduelles en fonction des valeurs prédites (Montgomery 1991). Si nécessaire, les variables étaient transformées soit en arc-sinus (proportion)⁻² ou en logarithme népérien (Sokal et Rohlf 1991). Des contrastes a posteriori ont été utilisés pour examiner les facteurs significatifs (Kirk 1982; Mize et Schulz 1985).

Le taux relatif de croissance (TRC) a été utilisé pour comparer la croissance entre les différentes combinaisons de lots de plants (Hunt 1982). Les différences entre le TRC des lots ont été testées par une analyse de variance des masses anhydres aérienne et racinaire transformées en logarithme népérien. Dans ce type d'analyse, une interaction significative entre le temps (année de l'échantillonnage) et les facteurs expérimentaux indiquent que les TRC sont différents entre les niveaux des facteurs expérimentaux. Le TRC est obtenu en ajustant des régressions polynomiales de la forme $\ln(M.S.) = a_0 + a_1T + \dots + a_nT^n$ au valeur de masse sèche (M.S.) en fonction du temps (T); le degré de la régression polynomiale est dérivé des contrastes orthogonaux T_1 , T_q et T_c (Poorter et Lewis 1986).

RÉSULTATS

Conditions climatiques du site de plantation

Les données climatologiques révèlent de fortes amplitudes thermiques jour/nuit (figure 5). Les semis plantés en mai ont subi deux épisodes de gel, les températures nocturnes descendant à -4,8°C. Les températures se sont maintenues au dessus du point de congélation pour une période de 109 jours consécutifs sans gel, soit jusqu'au 18 septembre, ce qui correspond au lendemain de la fin de la plantation de septembre. De mai à septembre, il est tombé 1 612 mm de pluie. Les précipitations étaient bien réparties durant toute la saison de croissance, les périodes entre deux jours sans pluie ne dépassant pas 7 jours. Le nombre de degré jours cumulés au dessus de 5°C pour l'année 1998 était de 1 109°C.

Survie

Le taux de survie a varié significativement ($p < 0,0001$) en fonction des types de plant (Tableau 2). Celui des mini-plants était en moyenne plus faible que celui des plants conventionnels ($p < 0,0001$). Les deux types de mini-plants se comportaient de la même façon ($p = 0,7576$), tout comme les deux types de plants conventionnels ($p = 0,1738$). Après 10 ans en plantation, le taux de survie des mini-plants se chiffrait à 91% compara-

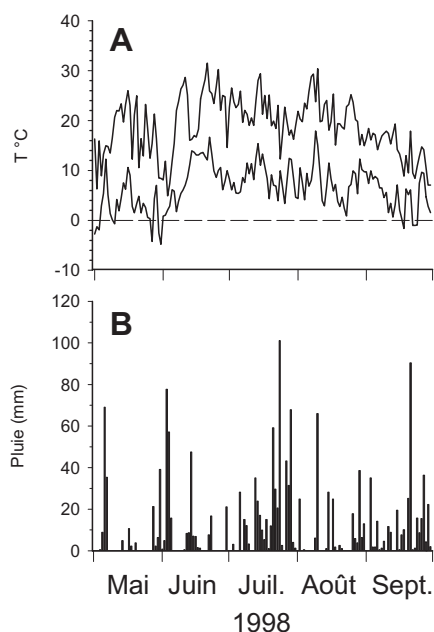


Figure 5. Relevés des températures maximales et minimales de même que des précipitations journalières enregistrées durant l'année de la plantation.

Tableau 2. Analyse de variance du pourcentage de survie des plants.

Source	d.l. num.	d.l. dén.	F	Prob.>F
Parcelles principales				
Type de plant (P)	3	76	14,18	<,0001
<i>Mini-plant vs Conv.</i>	(1)	76	40,56	<,0001
15 vs 25	(1)	76	0,01	0,7576
50 vs 110	(1)	76	1,88	0,1738
Date (D)	4	76	9,67	<,0001
<i>mai vs juin</i>	(1)	76	20,43	<,0001
<i>juin vs juil.</i>	(1)	76	0,43	0,5120
<i>juil. vs août</i>	(1)	76	0,09	0,7655
<i>août vs sept.</i>	(1)	76	6,57	0,0123
<i>mai vs sept.</i>	(1)	76	5,36	0,0232
P x D	12	76	0,88	0,5688
Sous-parcelles				
Année (A)	4	280	79,96	<,0001
A x P	12	280	0,73	0,7243
A x D	16	280	0,83	0,6562
A x P x D	48	280	1,15	0,2393

tivement à 96% pour les plants conventionnels (figure 6).

La date de plantation a influencé significativement le taux de survie des lots plantés en mai et septembre étant significativement moins élevé ($p < 0,05$) comparativement à ceux plantés en juin, juillet et août. Le pourcentage de survie moyen à la 10^{ième} année en plantation était de 89% pour les semis plantés en mai, 92% en septembre et 96% pour les trois autres dates (figure 7). Le taux de survie a aussi varié significative-

ment en fonction du temps, les composantes linéaire et quadratique ($p < 0,0001$) indiquant que la mortalité diminuait avec le temps. Le plus fort taux de mortalité se retrouvait la première année de la plantation, alors que peu de plants mouraient les années subséquentes (figures 6-7). L'absence d'interaction A x P ($p = 0,7243$) et A x D ($p = 0,6562$) indique que le profil temporel sur les dix ans du taux de survie était le même quelque soit les types de plants ou date de la plantation (tableau 2).

Croissance en hauteur

Le tableau d'analyse de variance de la croissance en hauteur durant les dix années en plantation montre une différence significative entre les types de plant ($p < 0,001$; Tableau 3). D'autre part, la forte interaction A x P ($p < 0,0001$) indique que les écarts relatifs de croissance en hauteur (transformation en log naturel) diminuaient dans le temps entre les différents types de plants. Ainsi, les mini-plants de 15 cm³ ont enregistré un gain relatif en hauteur de 860% en dix ans, ceux de 25 cm³ de 975%, comparativement à 630% pour les 50 cm³ et 460% pour les 110 cm³. Après 10 ans en planta-

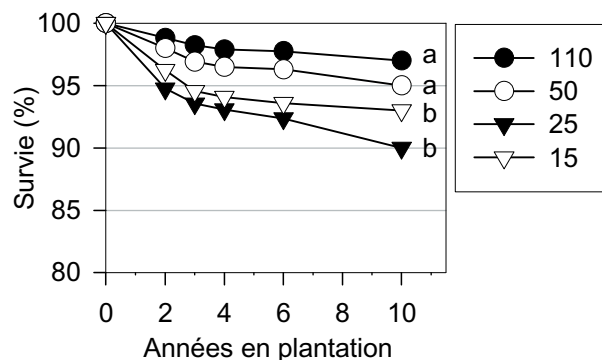


Figure 6. Pourcentage de survie des différents types de plants. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$.

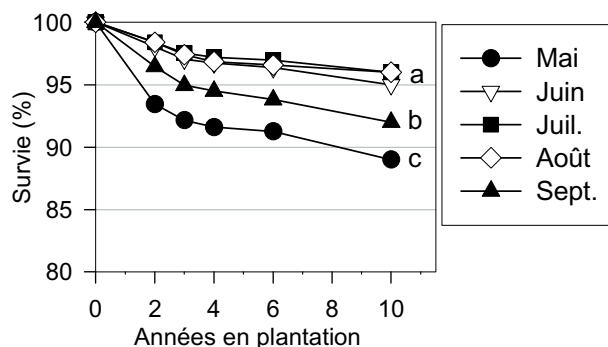


Figure 7. Pourcentage de survie des plants en fonction des différentes dates de plantation. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$.

Tableau 3. Analyse de variance de la hauteur et du diamètre de la tige des plants (transformés en log naturel).

Source	d.l. num.	d.l. dén.	Ln(Hauteur)		Ln(Diamètre)	
			F	Prob.>F	F	Prob.>F
Parcelles principales						
Type de plant (P)	3	80	116,86	<,0001	87,09	<,0001
<i>Mini-plant vs Conv.</i>	(1)	80	260,65	<,0001	200,23	<,0001
15 vs 25	(1)	80	5,66	0,0197	6,72	0,0113
50 vs 110	(1)	80	84,28	<,0001	54,35	<,0001
Date (D)	4	80	18,58	<,0001	29,82	<,0001
<i>mai vs juin</i>	(1)	79	12,35	0,0007	20,43	<,0001
<i>juin vs juil.</i>	(1)	79	9,75	0,0025	0,43	0,5121
<i>juil. vs août</i>	(1)	80	0,05	0,8258	0,09	0,7655
<i>août vs sept.</i>	(1)	80	30,70	<,0001	6,57	0,0123
<i>mai vs sept.</i>	(1)	80	24,36	<,0001	5,36	0,0233
P x D	12	80	1,66	0,0933	1,69	0,0842
Sous-parcelles						
Année (A)	4	283	1163,78	<,0001	1458,67	<,0001
A x P	12	293	5,86	<,0001	3,41	0,0001
<i>Mini-plant vs Conv. à 10 ans</i>	(1)	360	12,26	0,0005	13,76	0,0002
15 vs 25 à 10 ans	(1)	358	4,78	0,0295	3,74	0,0539
25 vs 50 à 10 ans	(1)	360	0,01	0,9192	0,60	0,4404
50 vs 110 à 10 ans	(1)	363	8,81	0,0032	3,12	0,0781
A x D	16	293	1,11	0,3452	0,62	0,8637
<i>mai vs juin à 10 ans</i>	(1)	353	0,53	0,4682	1,33	0,2498
<i>juin vs juil. à 10 ans</i>	(1)	359	0,24	0,6257	0,40	0,5299
<i>juil. vs août à 10 ans</i>	(1)	365	0,00	0,9839	0,00	0,9522
<i>août vs sept. à 10 ans</i>	(1)	365	9,52	0,0022	7,48	0,0066
A x P x D	48	292	0,57	0,9906	0,47	0,9990

tion, la hauteur des plants de 110 cm³ est toujours significativement plus élevée que les autres types de plant mais les mini-plants de 25 cm³ ne sont plus différents des plants conventionnels de 50 cm³ alors que ceux de 15 cm³ le sont (tableau 3; figure 8).

La date de plantation a influencé significativement la croissance en hauteur des plants ($p < 0,0001$; tableau

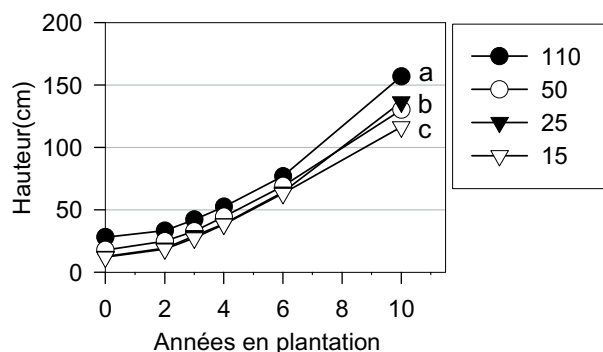


Figure 8. Croissance en hauteur des différents types de plant. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$.

3). Les plants plantés en septembre étaient nettement plus petits que ceux des quatre autres mois (figure 9). Ces écarts étaient toujours visibles même après dix années de croissance en plantation, la taille des lots plantés en septembre étant significativement plus faible par rapport aux autres lots plantés plus tôt durant l'année (tableau 3; figure 9).

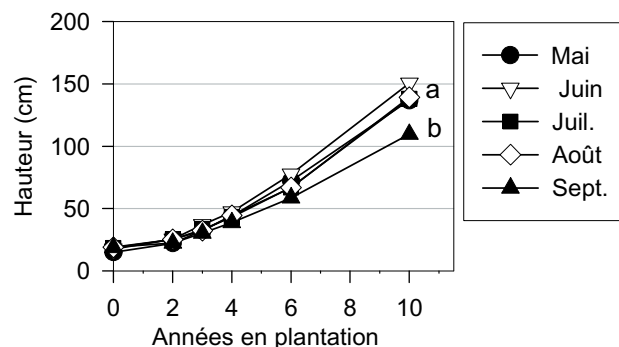


Figure 9. Croissance en hauteur des plants en fonction des différentes dates de plantation. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$.

Croissance en diamètre

L'analyse de variance du tableau 3 montre que le diamètre des différents types de plants est significativement différent ($p < 0,001$). Cette différence persiste jusqu'à la dixième année en plantation; le diamètre des plants de 110 cm³ est significativement plus grand que les autres mais ceux des mini-plants de 25 cm³ n'est pas différent des 50 cm³ alors que ceux de 15 cm³ le sont (tableau 3, figure 10).

L'analyse de variance du tableau 3 montre que le diamètre des plants des différentes dates de plantation est significativement différent ($p < 0,001$). Cette différence persiste jusqu'à la dixième année en plantation; le diamètre des semis plantés en septembre est significativement plus petit que ceux plantés de mai à août (tableau 3, figure 11).

Croissance de la biomasse

L'analyse de variance de la masse sèche de la cime montre des différences significatives entre les types de plants et les dates de plantation ($p < 0,0001$, tableau 4). À la sixième année en plantation, la masse sèche

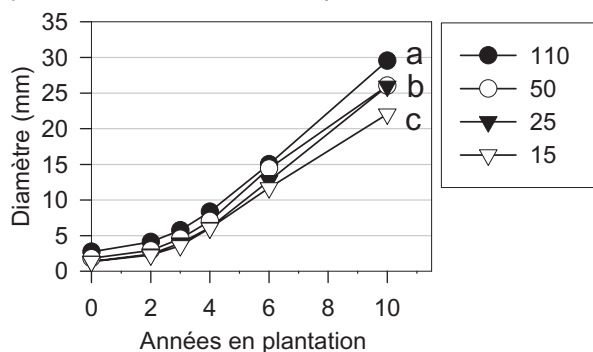


Figure 10. Croissance en diamètre des différents types de plant. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$.

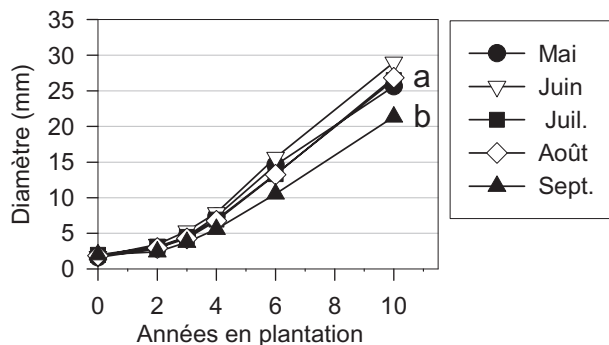


Figure 11. Croissance en diamètre des plants en fonction des différentes dates de plantation. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$.

des plants 110 cm³ est significativement plus élevée par rapport aux autres tandis que celle des 50 cm³ est plus élevée que celle des mini-plants (tableau 4, figure 12). La masse sèche des semis plantés en juin, est significativement plus grande que ceux plantés en mai, juillet ou août tandis que ceux plantés en septembre ont une masse sèche plus faible que tous les autres (tableau 4, figure 13).

L'analyse de variance de la masse sèche racinaire montre des différences significatives entre les types de plants et les dates de plantation ($p < 0,0001$, tableau 4). Après quatre ans en plantation, la masse sèche racinaire des plants 110 cm³ était significativement plus élevée que celle des 50 cm³ qui elle-même était plus élevée que celle des mini-plants (tableau 4, figure 14). La plus forte croissance en biomasse racinaire se retrouvait dans les plantations de juin tandis que celles de septembre étaient les plus faibles (tableau 3, figure 15).

La variation dans le temps de la masses sèche de la cime transformées en log naturel sont curvilinéaire ce qui signifie que les valeurs du TRC varient aussi dans

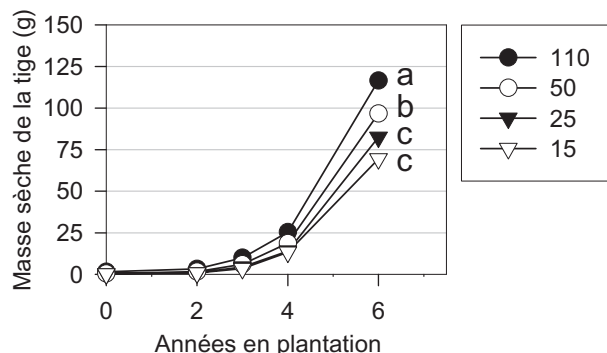


Figure 12. Croissance de la masse sèche de la partie aérienne des différents types de plant. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$.

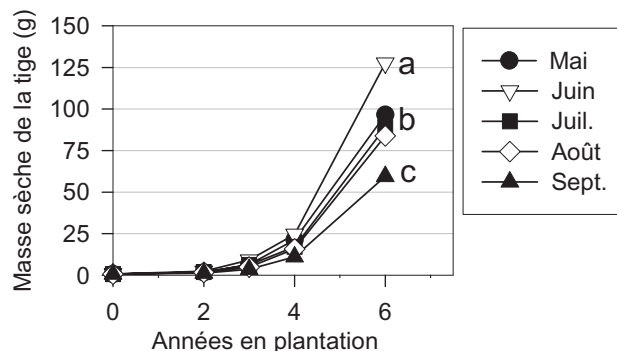


Figure 13. Croissance de la masse sèche de la partie aérienne des plants en fonction des différentes dates de plantation. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$.

Tableau 4. Analyses de variance de la masse sèche de la partie aérienne et racinaire des plants (transformées en log naturel) après respectivement six et quatre ans en plantation.

Source	Ln(M.S. tige)				Ln(M.S. racines)			
	d.l. num	d.l. dén.	F	Prob.>F	d.l. num	d.l. dén.	F	Prob.>F
Parcelles principales								
Type de plant (P)	3	76	107,30	<,0001	3	76	165,76	<,0001
<i>Mini-plant vs Conv.</i>	(1)	76	250,88	<,0001	(1)	76	401,65	<,0001
15 vs 25	(1)	76	5,88	0,0177	(1)	76	5,80	0,0185
50 vs 110	(1)	76	65,17	<,0001	(1)	76	89,85	<,0001
Date (D)	4	76	32,78	<,0001	4	76	20,54	<,0001
<i>mai vs juin</i>	(1)	76	13,44	0,0005	(1)	76	15,22	0,0002
<i>juin vs juil.</i>	(1)	76	26,28	<,0001	(1)	76	6,61	0,0121
<i>juil. vs août</i>	(1)	76	0,65	0,4220	(1)	76	3,05	0,0849
<i>août vs sept.</i>	(1)	76	27,40	<,0001	(1)	76	20,02	<,0001
<i>mai vs sept.</i>	(1)	76	56,23	<,0001	(1)	76	23,88	<,0001
P x D	12	76	1,73	0,0770	12	76	1,66	0,0944
Sous-parcelles								
Année (A)	3	240	1601,13	<,0001	2	160	487,36	<,0001
<i>A_{linéaire}</i>	(1)	240	4740,27	<,0001	(1)	160	974,50	<,0001
<i>A_{quadratique}</i>	(1)	240	229,45	<,0001	(1)	160	0,21	0,6471
A x P	9	240	4,53	<,0001	6	160	1,98	0,0717
<i>Mini-plant vs Conv. à 6¹ ans</i>	(1)	311	27,11	<,0001	(1)	231	105,62	<,0001
15 vs 25 à 6 ¹ ans	(1)	313	1,96	0,1630	(1)	232	0,23	0,6326
50 vs 110 à 6 ¹ ans	(1)	309	3,96	0,0476	(1)	231	29,55	<,0001
A x D	12	240	0,65	0,7979	8	160	1,30	0,2480
<i>mai vs juin à 6¹ ans</i>	(1)	311	3,10	0,0795	(1)	231	3,40	0,0666
<i>juin vs juil. à 6¹ ans</i>	(1)	309	10,31	0,0015	(1)	232	6,19	0,0136
<i>juil. vs août à 6¹ ans</i>	(1)	311	0,15	0,6970	(1)	232	0,88	0,3488
<i>août vs sept. à 6¹ ans</i>	(1)	313	4,99	0,0263	(1)	231	12,56	0,0005
A x P x D	36	240	0,66	0,9303	24	160	0,94	0,5440

M.S. : masse sèche.

1: les comparaisons sont à 4 ans dans le cas de la masse sèche des racines.

le temps et que le patron de croissance produit un effet quadratique ($p < 0,0001$). L'effet global du temps s'est

manifesté par une diminution du TRC (figure 16A-B). L'interaction A x P indique une convergence du TRC

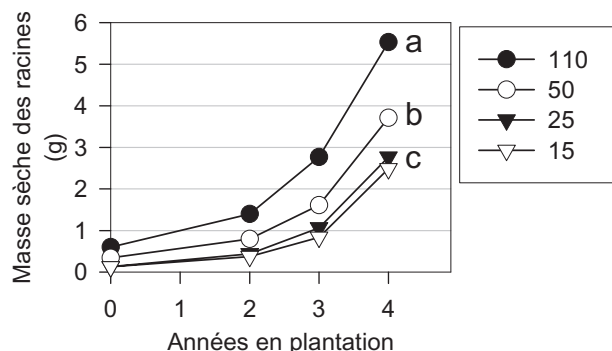


Figure 14. Croissance de la masse sèche racinaire des différents types de plant. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$.

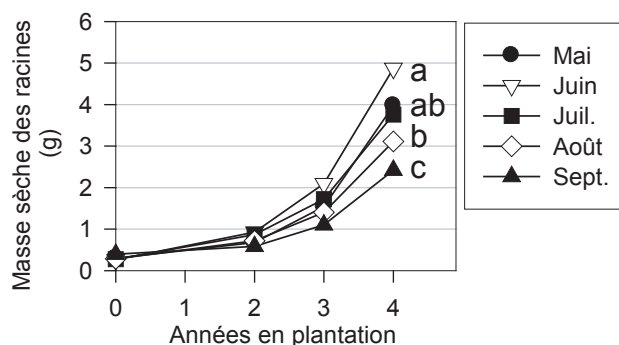


Figure 15. Croissance de la masse sèche racinaire des plants en fonction des différentes dates de plantation. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$.

des différents types de plant ($p < 0,0001$), laquelle est absente dans le cas du facteur date de plantation ($p = 0,7979$).

Le TRC des racines ne variait pas dans le temps puisque seule la composante linéaire du temps T_1 était significative ($p < 0,0001$). L'absence d'interaction A x P

ou A x D indique que les masses racinaires de tous les lots de plants poussaient au même rythme, quelque soit leur date de plantation. Le TRC des mini-plants était significativement plus élevé, cependant, comparativement aux plants conventionnels (figures 17A-B).

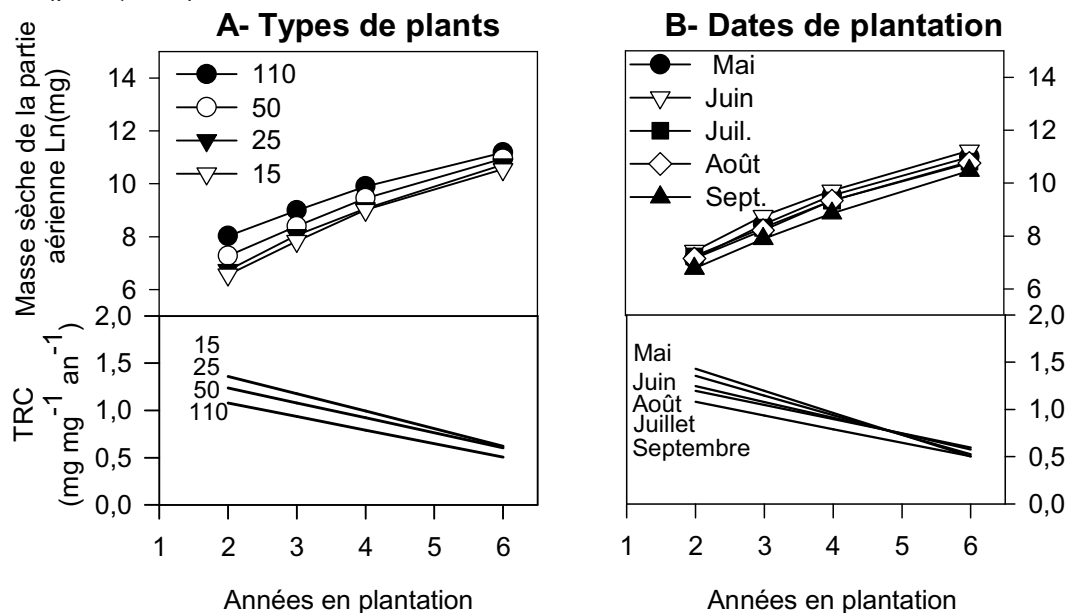


Figure 16. Variation annuelle de la masse sèche de la partie aérienne des plants (transformation en Log naturel) ainsi que le taux relatif de croissance (TRC) en fonction des différents types de plant (A) et des différentes dates de plantation.

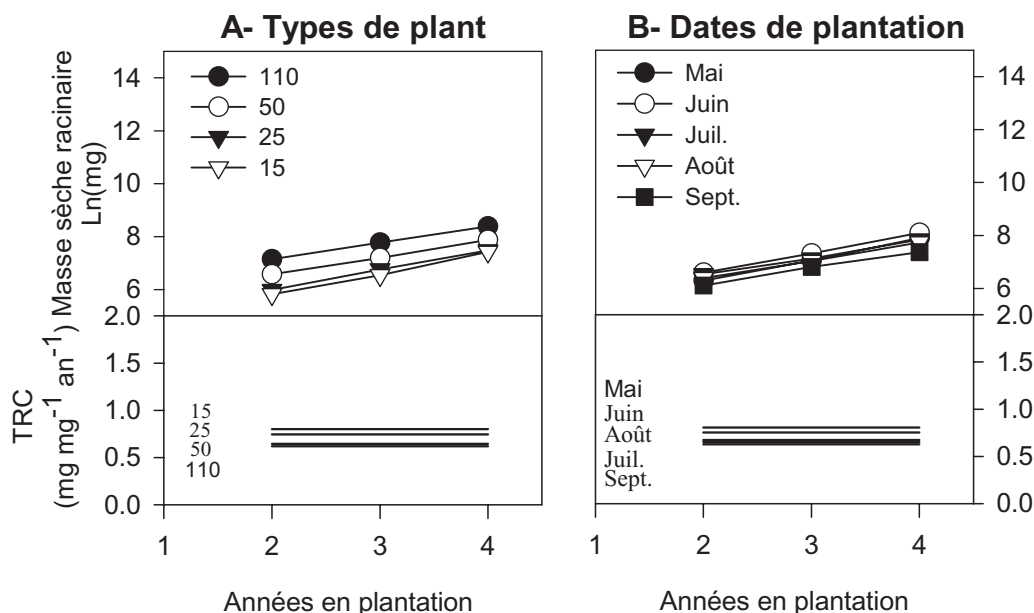


Figure 17. Variation annuelle de la masse sèche racinaire des plants (transformation en Log naturel) ainsi que le taux relatif de croissance (TRC) en fonction des différents types de plant (A) et des différentes dates de plantation.

Racines adventives

L'analyse de variance du tableau 5 montre que le pourcentage de racines adventives différait significativement entre les types de plants ($p = 0,0247$). En moyenne, 58% des racines des mini-plants étaient d'origine adventives pour seulement 44% chez les plants conventionnels (figure 18). La date de plantation n'a pas influencé la formation de racines adventives ($p = 0,0666$).

Teneur foliaire en éléments nutritifs

Les concentrations foliaires en N, P et K variaient significativement en fonction du type de plants ($p < 0,005$, tableau 6); globalement, ces concentrations foliaires en N, P et K des mini-plants étaient légèrement plus élevées ($p < 0,0017$) que celles des plants conventionnels ($p < 0,05$). Les valeurs de N, P et K diminuaient linéairement dans le temps (figure 19A) de même que les valeurs de Ca et Mg (données non présentées). L'interaction significative A x P pour les valeurs de N s'explique par des écarts significatifs entre les types de plants durant la deuxième année en plantation ($p < 0,001$). À cette date, les teneurs en N des plants cultivés en 110 cm³ étaient nettement plus faibles que les autres, soit 1,5% comparativement à 1,8% pour les 50 cm³ et 1,9% pour les 15 et

Tableau 5. Analyse de variance du pourcentage de racines adventives.

Source	d.l. num.	d.l. dén.	F	Prob.>F
Type de plant (P)	3	38	3,49	0,0247
<i>Mini-plant vs Conv.</i>	(1)	38	8,87	0,0050
15 vs 25	(1)	38	0,36	0,5533
50 vs 110	(1)	39	1,24	0,2720
Date (D)	4	38	2,40	0,0666
P x D	12	38	0,93	0,5247

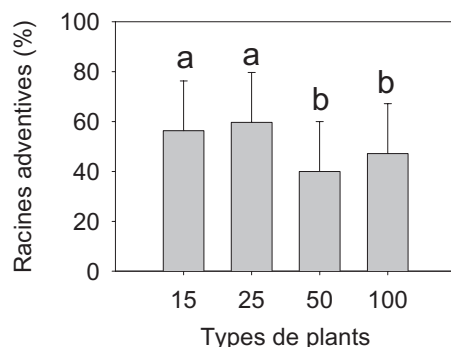


Figure 18. Pourcentage de racines adventives des différents types de plants. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$.

25 cm³. L'interaction significative A x P pour les valeurs de K s'explique par le fait que les concentrations en K des 110 cm³ étaient nettement plus faibles que celles des autres types de plant durant la troisième année ($p < 0,001$). Ces écarts des concentrations foliaire en N, P et K s'atténuait dans le temps et n'étaient plus significatives après 10 ans en plantation (figure 19A).

La date de plantation n'a influencé que les valeurs de N ($p = 0,0009$). Durant la deuxième année en plantation, les valeurs de N diminuait linéairement entre les lots plantés de mai à septembre; par contre, ces écarts entre les lots disparaissaient les années suivantes (figure 19B). Après dix ans en plantation, tous les stock de plants avaient des concentrations similaires en N (0,73%), P (0,12%), K (0,46%), Ca (0,56%) et Mg (0,07%), quelque soit leur date de plantation.

DISCUSSION

Taux de survie

L'hypothèse que le taux de survie des mini-plants pourrait se comparer favorablement aux plants conventionnels sous des conditions identiques de climat et de préparation de terrain a été vérifiée (Tableau 2, figures 6-7). Même s'il est significativement plus bas, il n'est que légèrement inférieur aux taux de survie des plants conventionnels utilisés dans cette expérience. Il se rapproche aussi du taux moyen retrouvé pour des plantations en forêt boréale de la région étudiée, celui-ci se situant à 94% - 95% cinq ans après la plantation pour l'épinette noire cultivée en récipients 50 ou 110 cm³ (Trottier 1998). Après dix ans en plantation, la densité en plants des parcelles reboisées en mini-plants variait de 2 150 à 2 400 tiges ha⁻¹, ce qui surpassait largement la norme d'aménagement de 1 500 tiges ha⁻¹ pour considérer une plantation suffisamment stockée en plants (MRN 1997).

Sutherland et Day (1988) et Paterson (1997) ont aussi démontré l'absence de corrélation très nette entre le taux de survie des semis d'épinette noire et la taille du récipient de culture. D'après Hines et Long (1986), 90% de la mortalité durant la première année en plantation est attribuable à la sécheresse et les plants de plus gros diamètre seraient moins affectés puisqu'ils auraient une plus grande capacité de production de nouvelles racines. Arnott (1981) a aussi observé que la mortalité des semis de petites tailles (10-15 cm) durant la première saison de la plantation est le résultat d'un stress hydrique causé par le débourrement de la tige.

Les taux de survie élevés dans notre étude pourraient s'expliquer par l'utilisation des traitements de

Tableau 6. Analyses de variance du contenu foliaire en minéraux.

Source	d.l. num.	d.l. dén.	[N]		[P]		[K]	
			F	Prob.>F	F	Prob.>F	F	Prob.>F
Parcelles principales								
Type de plant (P)	3	73	7,75	0,0001	4,27	0,0076	2,99	0,0361
<i>Mini-plant vs Conv.</i>	(1)	73	20,45	<,0001	10,66	0,0016	5,46	0,0221
15 vs 25	(1)	73	0,48	0,4897	0,74	0,3931	0,20	0,6594
50 vs 110	(1)	73	2,30	0,1334	1,42	0,2369	3,32	0,0724
Date (D)	4	73	5,29	0,0009	0,83	0,5118	0,95	0,4379
<i>mai vs juin</i>	(1)	73	3,34	0,0718	-	-	-	-
<i>juin vs juil.</i>	(1)	73	1,05	0,3100	-	-	-	-
<i>juil. vs août</i>	(1)	73	1,18	0,2805	-	-	-	-
<i>août vs sept.</i>	(1)	73	0,02	0,8908	-	-	-	-
<i>mai vs sept.</i>	(1)	73	14,43	0,0003	-	-	-	-
P x D	12	73	0,43	0,9459	0,73	0,7155	0,50	0,9100
Sous-parcelles								
Année (A)	4	277	420,05	<,0001	526,94	<,0001	156,29	<,0001
A x P	12	287	2,37	0,0063	1,38	0,1766	2,43	0,0051
P à 2 ans	(4)	354	26,37	<,0001	-	-	1,69	0,1684
P à 3 ans	(4)	354	0,604	0,6602	-	-	8,94	<,0001
P à 4 ans	(4)	354	1,36	0,2475	-	-	0,35	0,7856
P à 6 ans	(4)	354	0,21	0,9326	-	-	0,50	0,6791
P à 10 ans	(4)	354	0,115	0,9770	-	-	1,09	0,3523
<i>Mini-plant vs Conv. à 2 ans</i>	(1)	354	30,94	<,0001	-	-	11,27	0,0009*
15 vs 25 à 2 ans	(1)	354	0,16	0,6887	-	-	0,09	0,76456*
50 vs 110 à 2 ans	(1)	354	14,45	0,0002	-	-	15,46	<,0001*
A x D	16	287	5,62	<,0001	1,19	0,2734	1,16	0,3036
Date à 2 ans	(4)	354	0,60	<,0001	-	-	-	-
<i>mai vs juin à 2 ans</i>	(1)	354	7,33	0,0071	-	-	-	-
<i>juin vs juil. À 2 ans</i>	(1)	354	7,46	0,0066	-	-	-	-
<i>juil. vs août à 2 ans</i>	(1)	354	8,92	0,0030	-	-	-	-
<i>août vs sept à 2 ans</i>	(1)	354	0,03	0,8608	-	-	-	-
<i>mai vs sept. à 2 ans</i>	(1)	356	0,00	0,9761	-	-	-	-
Date à 3 ans	(4)	354	26,37	0,6602	-	-	-	-
Date à 4 ans	(4)	354	1,36	0,2475	-	-	-	-
Date à 6 ans	(4)	354	0,21	0,9326	-	-	-	-
Date à 10 ans	(4)	356	0,12	0,9770	-	-	-	-
A x P x D	48	286	0,90	0,6684	1,37	0,0643	0,78	0,8468

* ces contrastes s'appliquent à la troisième année en plantation.

jours courts avant la plantation, ce qui s'est traduit par une absence de croissance en hauteur de la tige à la première année sur le terrain, quelque soit la date de plantation. Comme la croissance racinaire n'est pas contrôlée par la photopériode, au contraire de la croissance épigée, la régulation de la photopériode permet de moduler le rapport masse aérienne/masse racinaire (Heide 1974). Ce traitement est surtout utilisé pour augmenter la résistance au froid des semis qui hivernent à l'extérieur et, du même coup, augmenter le rapport masse aérienne/masse racinaire et le rapport hauteur/diamètre (Hawkins *et al.* 1996). L'utilisation d'un traitement photopériodique de jours courts pour endurcir les plants avant leur reboisement en été est une pratique dont les effets commencent à être documentée, mais

les résultats sont parfois contradictoires (Tan 2007; Tan *et al.* 2008). D'après Grossnickle (2000), les semis soumis à un traitement de jours courts ne développent pas nécessairement une plus grande résistance aux stress durant l'été par rapport à ceux qui ont une croissance épigée, mais par contre celle-ci est plus élevée à l'automne. Johansson *et al.* (2007) attribuent les faibles taux de survie enregistrés pour certains de leurs semis de petite taille à un environnement de plantation défavorable, mais aussi au fait que ces semis n'étaient pas en dormance durant leur transport et leur entreposage.

Les résultats montrent que la date de plantation a eu un effet significatif sur le taux de survie, les plantations exécutées en mai et en septembre ayant les taux les

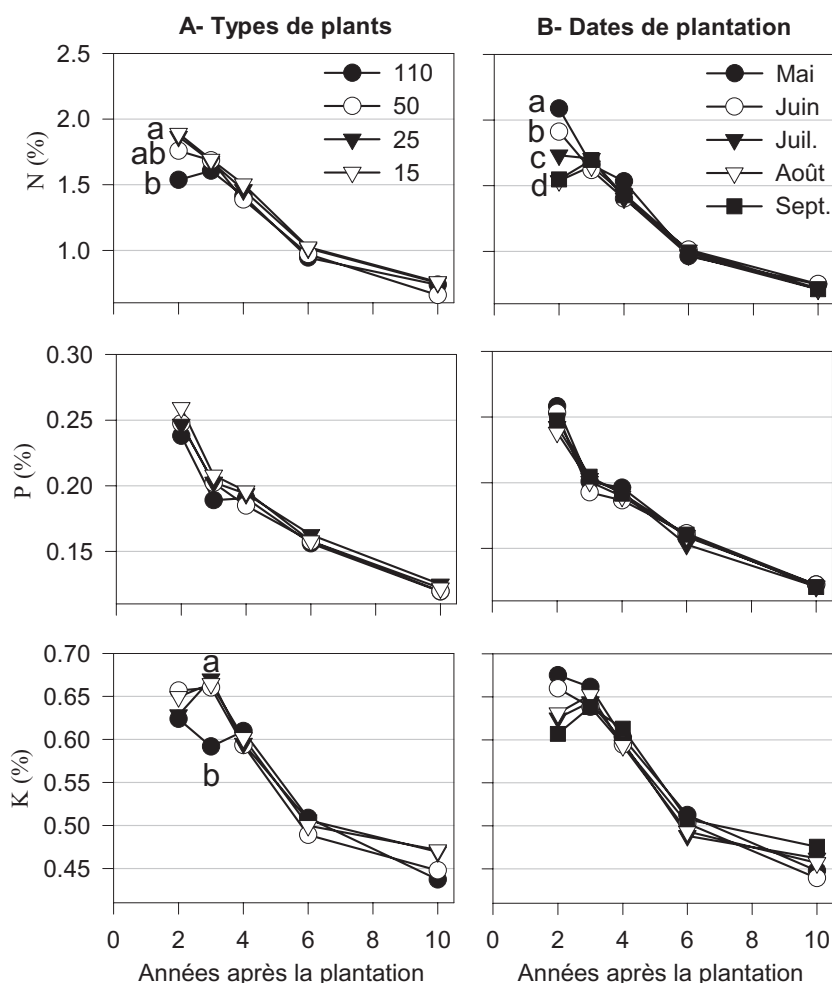


Figure 19. Variation des concentrations foliaires en N, P et K en fonction (A) des différents types de plant et (B) des différentes dates de plantation. Les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives à $p < 0,05$.

plus bas. Notons tout de même que le taux le plus bas est de 89 % après dix ans en plantation, ce qui est amplement suffisant pour régénérer adéquatement les parterres plantés. Les gels nocturnes qui ont été enregistrés en mai et septembre pourraient être responsables de cette mortalité significativement plus élevée. Le méristème apical de même que les nouvelles aiguilles des jeunes semis sont particulièrement sensibles à un gel, même léger (-3°C) (Sutinen *et al.* 2001). Dans les régions nordiques, les blessures causées par les gels survenant durant la saison de croissance sont considérées par certains comme le facteur le plus critique dans le succès d'une plantation (Sakai et Larcher 1987). Dans notre étude, l'absence d'interaction significative entre les facteurs récipiends et date de plantation ($P \times D$, tableau 2) suggère que tous les types de plants, mini ou conventionnels, ont été affectés de la même façon par les conditions environnementales présentes lors de

l'année de la plantation.

Croissance en hauteur et en diamètre de la tige

Les résultats de l'étude montrent clairement que la croissance en hauteur des mini-plants se compare avantageusement à celle des plants conventionnels (figures 8-9). Les écarts existants entre les gabarits de plants au début de l'expérience n'ont pas augmenté de façon importante durant les dix années de l'étude, la croissance annuelle étant pratiquement la même pour tous les types de plant. La croissance moyenne en hauteur des quatre types de semis était de 11 cm par an pendant les 5 premières années de croissance, ce qui est comparable aux résultats de Prévost et Dumais (2003) qui ont mesuré des croissances similaires dans leur étude sur l'épinette noire située dans la même zone écologique que la nôtre. Dans notre cas, la croissance en hauteur a augmenté de 5 à 15 cm par an durant les 4 premières années pour se stabiliser la cinquième année. Prévost et Dumais (2003) attribuent la diminution du taux de croissance en hauteur après 4 ans au retour progressif de la végétation de compétition. Dans notre étude, la diminution de la croissance observée ne serait pas causée par le retour de la végétation de compétition qui était visuellement peu abondante 5 ans après la plantation; la présence de feuillus de lumière n'était que sporadique. Il a été

démonstré que la préparation de terrain avant la plantation avec un scarificateur à disques de type TTS est efficace pour contrôler la végétation d'éracacée jusqu'à cinq ans après le traitement (Prévost 1997). Le *Kalmia* est reconnu par contre pour exercer une immobilisation biochimique de l'azote minéral du sol (Damman 1971; Bradley *et al.* 2000). Il est donc fort possible que la diminution de la croissance en hauteur soit causée par un manque de disponibilité de l'azote dans le sol.

Dans notre étude, la date de plantation a aussi eu un effet significatif sur la croissance en hauteur (figure 9). La taille de plants diminuait en fonction de la date de plantation, diminution qui était encore significative même après dix ans en plantation. Les semis plantés en septembre avaient le plus faible bilan de croissance, soit une réduction de 22% par rapport aux autres plan-

tations. La différence était toujours significative après dix ans en plantation. Sutton (1982) rapporte que les plantations tardives à l'automne ne permettent pas aux plants de croître l'année de l'installation; les plants sont en dormance à ce moment-là et ne débourrent que le printemps suivant. Rappelons toutefois que, dans la présente expérience, les traitements de jour court donnés aux plants avant leur plantation ont fait en sorte qu'ils n'ont pas refait de croissance en hauteur de la tige durant l'année de la plantation.

L'absence d'interaction entre les facteurs réceptants et date de plantation ($P \times D$, tableau 3) indique aussi que les mini-plants se comportent de la même façon que les plants conventionnels. La croissance en diamètre de la tige suivait le même patron que la croissance en hauteur (figures 10-11).

Croissance de la biomasse

L'analyse du taux relatif de croissance présenté dans notre étude montre que la biomasse aérienne des différents types de semis évoluait d'une manière très similaire durant les six saisons de croissance en forêt. Le TRC de tous les types de plant diminuait linéairement dans le temps et convergeait à la sixième année. Si les plants cultivés dans les réceptants 110 cm^3 avaient une biomasse plus importante au moment de la plantation, leur TRC était par contre le plus faible des quatre types de plants. Lamhamedi et al. (1998) ont aussi trouvé que le TRC des «gros plants» (cavités de 700 cm^3) était significativement plus faible que celui des «plants moyens» (cavités de 340 cm^3) eux-mêmes plus faible que les plants plus «petits» (cavités de 110 cm^3). Dans cette étude, tous les stocks de plants ont montré une bonne reprise de croissance dès la deuxième année en plantation. Le faible volume des réceptants de 15 et 25 cm^3 n'a pas été un frein au développement des plants durant les six saisons de croissance puisqu'ils présentaient des TRC similaires à ceux des stocks de plants plus grands (figure 16). Sur les stations de la forêt boréale sujettes à l'envahissement par les éricacés ou les cladonies, un scarifiage qui expose en partie le sol minéral et qui incorpore la matière organique diminue l'interférence de ces espèces et augmente la température du sol (Thiffault et al. 2003). En exposant le sol minéral, le scarifiage empêche la dispersion du *Kalmia* par ses rhizomes à travers la tranchée formée par le sillon (Titus et al. 1995).

Statut nutritif

Durant la seconde saison de croissance en plantation, tous les types de plants présentaient des teneurs en N, P et K dans les aiguilles de l'année en cours au dessus

des valeurs de 1,2 %, 0,14 % et 0,30 %, respectivement, lesquelles sont considérées comme des valeurs seuils d'une carence minérale chez l'épinette noire (Swan 1970). À ce point de vue, les plus petits plants ($15, 25, 50 \text{ cm}^3$) présentaient le meilleur bilan la deuxième saison en plantation (figure 19). La taille réduite des mini-plants n'a donc pas été un handicap puisque leur taux relatif de croissance était supérieur aux plants conventionnels. Il est probable que le développement rapide du réseau racinaire hors de la motte de tourbe, incluant des racines adventives, explique l'amélioration du statut nutritif l'année de l'installation des semis. Par contre, ces différences s'estompaient les années suivantes et les teneurs foliaires en N, P et K diminuaient constamment les années suivantes, ce qui laisse supposer une disponibilité plus faible de ces trois éléments sur le site de reboisement.

L'azote est considéré comme l'élément le plus limitant pour la croissance des plantes dans la forêt boréale (Munson et Timmer 1989). Cinq ans après la plantation, la teneur foliaire en N des semis était en dessous de la valeur de 1,2% considéré comme le seuil où une déficience minérale apparaît et entraîne une baisse de la croissance (Swan 1970). Il faut remarquer cependant que tous les types de plants ont réagi de la même façon. L'étude de Prévost et Dumais (2003) a démontré que le scarifiage a un effet positif sur la disponibilité de N présent dans le sol, mais que cet effet disparaît avec le temps, les teneurs en N, P et K diminuant de 14, 19 et 31% entre les années 5 et 10 après le traitement de scarifiage. Il est possible que la présence accrue des espèces concurrentes ait réduit la croissance des résineux en diminuant la disponibilité des éléments nutritifs du sol, surtout au niveau de l'azote (Brand et Janas 1988). À l'exception de la seconde année en plantation où on remarque un net avantage des semis plus petits, les teneurs en éléments minéraux diffèrent très peu par la suite entre les types de plants et les dates de plantation. La diminution constante dans le temps des concentrations foliaires en N, P et K serait attribuable à un rééquilibrage minéral du plant avec le statut nutritif du site particulièrement pauvre en azote.

La date de plantation a eu un effet important sur les teneurs foliaires en N et en K lors de la seconde année en plantation puisque les concentrations foliaires diminuaient linéairement de mai à septembre (figure 19B). Cette tendance était présente chez tous les types de plants et vont dans le même sens que les données de croissance. La température du sol dans les microsites scarifiés diminue drastiquement à partir de la fin août (Prévost 1996). Chez l'épinette noire, la température du sol est le principal régulateur de la croissance des racines, la croissance stoppant à partir de température

en dessous de 5°C (Lamhamedi et Bernier 1994). Dans la pessière noire nordique, en plus de l'azote, la croissance des semis serait surtout limitée par la température du sol qui inhiberait la croissance racinaire après le mois d'août.

CONCLUSION

Les mini-plants produits dans les récipients de 15 et 25 cm³ ont démontré qu'il pouvait s'implanter et croître tout aussi bien que les plants utilisés conventionnellement dans un environnement comportant peu de végétation de compétition lors de la plantation. Même si cet environnement est aussi caractérisé par un climat réputé rigoureux, leur taux relatif de croissance était plus élevé que celui des plants cultivés en récipients de 50 et 110 cm³. Leur taux de survie après dix ans en plantation était plus que suffisant pour assurer une régénération adéquate du site de plantation.

Ces plants peuvent être produits en 18 semaines, soit 7 semaines de moins que les plants conventionnels cultivés en récipients de 50 cm³ et une année de moins que ceux cultivés en récipients de 110 cm³. En fait, on peut même penser à des scénarios de production qui irait du semis à la plantation au cours de la même année, ce qui est difficile à réaliser à un coût acceptable pour les plants cultivés en récipients de 50 cm³, et pratiquement impossible pour ceux cultivés en récipients de 110 cm³. Le plus grand nombre de cavités pour une même surface de récipients permet aussi de produire en moins de temps deux fois plus de semis sur la même surface de culture. Il permet également de doubler la quantité de semis transportés par unité de volume de chargement. Enfin, un planteur a moins souvent besoin de se réapprovisionner. Les avantages potentiels des mini-plants se situeraient donc à tous les niveaux des coûts de l'opération reboisement, tant la production que le transport et la plantation. Si la réduction au niveau des coûts de transport est évidente, les démonstrations restent cependant à faire pour les étapes production et plantation. Enfin, un autre avantage opérationnel de la petite dimension de ces plants tient à leur motte de tourbe moins longue et, conséquemment, à une plus grande facilité d'utilisation pour plantation sur les sols minces. Ceux-ci se retrouvent sur de grande superficie dans l'ensemble de la forêt boréale québécoise caractérisée par une faible végétation de compétition.

Les résultats obtenus indiquent aussi que les mini-plants ont répondu de la même façon que les plants conventionnels aux conditions environnementales qui prévalaient sur les sites expérimentaux au moment de la plantation et durant les neuf années suivantes. Ils confirment aussi que les plantations de printemps

(mai-juin) ou d'été (juillet-août) doivent être favorisés si l'objectif est de permettre aux plants d'atteindre leur plein potentiel de croissance. Les semis plantés en septembre sont défavorisés à long terme puisque la biomasse de la tige n'est que de 59% de la moyenne des autres plantations après cinq saisons de croissance. Il est quand même intéressant de constater que le taux de survie est là aussi amplement suffisant pour permettre une régénération plus que suffisante du site planté.

Depuis le début du projet, d'autres sites expérimentaux ont été reboisés avec des plants cultivés dans des récipients de 15 et 25 cm³ afin de valider les conclusions émises dans ce travail (données non-présentées). Les résultats obtenus pour ces autres sites sont conformes à ceux présentés ici.

RÉFÉRENCES

- Arnott, J.T. 1981. Survival and growth of bullet, styroplug and bareroot seedlings on mid-elevation sites in coastal British Columbia. *For. Chron.* 57: 65-70.
- Bigras, F.J., et A.D. D'Aoust 1992. Hardening and dehardening of shoot and roots of containerized black spruce and white spruce seedlings under short and long days. *Can. J. For. Res.* 22: 388-396.
- Bradley, R.L., B.D Titus et C.P. Preston 2000. Changes to mineral N cycling and microbial communities in black spruce humus after addition of (NH₄)₂SO₄ and condensed tannins extracted from *Kalmia angustifolia* and balsam fir. *Soil Biol. Biochem.* 32: 1227-1240.
- Brand, D.G. et P.S. Janas 1988. Growth and acclimation of planted white pine and white spruce seedlings in response to environmental conditions. *Can. J. For. Res.* 18: 320-329.
- Damman, A.W.H. 1971. Effect of vegetation changes on the fertility of a Newfoundland forest site. *Ecol. Monograph.* 41: 253-270.
- Environnement Canada. 2011. Normales climatiques au Canada 1971-2000. http://www.climate.weather-office.ec.gc.ca/climate_normals/ [mis à jour le 28 sept. 2010].
- Epstein, E. 1972. Mineral nutrition of plants: principles and perspectives. John Wiley and Sons, New-York. 412 p.
- Gardner, A.C. 1982. Field performance of containerized seedlings in interior British-Columbia. *Dans J.,B.*

- Scarrat, C. Glerum et C.A. Plexman (éditeurs). Proceedings of the Canadian Containerized Tree Seedling Symposium, sept. 14-16, 1981, Toronto, Ont. Pp. pp. 299-305. Dept. of the Environment. Can. For. Serv. Great Lakes For. Res. Ctr. Sault Ste Marie, ON.
- Gingras, B.-M. et S. Richard 1999. Bilan du développement des réceptacles à parois ajourées : culture des semis en pépinière et performance en plantation comparative. Ministère des Ressources naturelles. Dir. Rech. For. Québec. 74 p.
- Goulet, F. 1995. Frost heaving of forest tree seedlings: a review. *New For.* 9: 67-94.
- Grossnickle, S.C. 2000. Ecophysiology of northern spruce species: the performance of planted seedlings. NRC Research Press, Ottawa, Ontario, Canada. 409 p.
- Grossnickle, S.C., et R.S. Folk 1993. Stock quality assessment: forecasting survival of performance on a reforestation site. *Tree Planters' Notes* 44: 113-121.
- Hawkins, C.D.B. Eastham, A.M. Story, T.L. Eng, R.Y.N. et D.A. Draper 1996. The effect of nursery black-out application on sitka spruce seedlings. *Can. J. For. Res.* 26: 2201-2213.
- Heide, O.M. 1974. Growth and dormancy in Norway spruce ecotypes (*Picea abies*) I. Interaction of photoperiod and temperature. *Physiol. Plant.* 30: 1-12.
- Hines F.D. et J.N. Long 1986. First- and second-year survival of containerized Engelmann spruce in relation to initial seedling size. *Can. J. For. Res.* 16: 668-670.
- Hunt, R. 1982. Plant growth curves – The functional approach to plant growth analysis. Edward Arnold (Publishers) Ltd., London. 248 p.
- Inderjit, I., et A.U. Mallik 2002. Can *Kalmia angustifolia* interference to black spruce (*Picea mariana*) be explained by allelopathy ? *For. Ecol. Manage.* 160: 75-84.
- Johansson, K., U. Nilsson et H.L. Allen 2007. Interactions between soil scarification and Norway spruce seedlings types. *New Forests* 33: 13-27.
- Kirk, R.E. 1982. Experimental design: procedures for the behavioral sciences. Second Edition. Brooks/Cole Publ. Co. Belmont, California. 911 p.
- Krasowski, M.J., et D. Simpson 2001. Frost-related problems in the establishment of coniferous forests. Dans F.J. Bigras and S.J. Colombo (eds.), *Conifer Cold Hardiness*, 253-285. Kluwer Academic Publ. Netherlands.
- Lamhamedi, M.S. et P.Y. Bernier 1994. Ecophysiology and field performance of black spruce (*Picea mariana*): a review. *Ann. Sci. For.* 51 : 529-551.
- Lamhamedi, M. S., P.Y. Bernier, C. Hébert et R. Jobidon 1998. Physiological and growth responses of three sizes of containerized *Picea mariana* seedlings outplanted with and without vegetation control. *For. Ecol. Manage.* 110: 13-23.
- Lamhamedi, M. S., J. Gagnon et F. Colas 2003. Recherche-développement en production de semences et de plants forestiers au Québec : principales réalisations et perspectives d'avenir. pp. 17-32. Actes des Colloques du Carrefour Forestier, 19 février 2003, Centre des Congrès de Québec, Québec, Canada.
- Lindstrom, A., C. Hellqvist et E. Stattin 2005. Mini seedlings – a new forest regeneration system. Dans S.J. Colombo (éditeur). *The Thin Green Line A Symposium on the State-of-the-art in Reforestation Proceedings*. July 26-28, 2005. Thunder Bay, Ontario, Canada . pp. 59-61. Ontario For. Res. Inst., ON. Min. Nat. Res., Sault Ste Marie, ON.
- Mize, C.W. et R.C. Schultz 1985. Comparing treatment means correctly and appropriately. *Can. J. For. Res.* 15: 1142-1148.
- MRN 1997. Manuel d'aménagement forestier, Troisième Édition. Ministère des Ressources naturelles, Charlebourg (Québec). 122 p.
- MRN 2002. Rapport sur l'état des forêts québécoises 1995-1999. Code de diffusion 2002-2073. Ministère des Ressources naturelles. Québec (Québec). 272 p.
- MRNF 2007. Ressources et industries forestières – Portrait statistique, Édition 2007. Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune. Québec (Québec). 506 p.
- Montgomery, D.C. 1991. Design and analysis of experiments. Third Edition. John Wiley & Sons, New

York. 649 p.

- Munson, A.D. et V.R. Timmer 1989. Site-specific growth and nutrition of planted *Picea mariana* in the Ontario Clay Belt. II. Effects of nitrogen fertilization. *Can. J. For. Res.* 19: 171-178.
- Paterson, J. 1997. Growing environment and container type influence field performance of black spruce container stock. *New Forests* 13: 329-339.
- Paterson, J., D. DeYoe, S. Millson et R. Galloway 2001. Handling and planting of seedlings. *Dans* R.G. Wagner et S.J. Colombo (éditeurs). *Regenerating the Canadian Forest: principles and practice for Ontario*. pp. 325-341. Fitzhenry & Whiteside, Markham, ON. 650 p.
- Poorter, H., et C. Lewis 1986. Testing differences in relative growth rate: a method avoiding curve fitting and pairing. *Physiol. Plant.* 67: 223-226.
- Prévost, M. 1996. Effets du scarifiage sur les propriétés du sol et l'ensemencement naturel dans une pessière noire à mousses dans la forêt boréale québécoise. *Can. J. For. Res.* 26: 72-86.
- Prévost, M. 1997. Effects of scarification on seedbed coverage and natural regeneration after a group seed-tree cutting in a black spruce (*Picea mariana*) stand. *For. Ecol. Manage.* 94: 219-231.
- Prévost, M. et D. Dumais 2003. Croissance et statut nutritif de marcottes, de semis naturels et de plants d'épinette noire à la suite de scarifiage : résultats de 10 ans. *Can. J. For. Res.* 33: 2097-2107.
- Quinn, G.P. et M.J. Keough 2002. *Experimental design and data analysis for biologist* Cambridge University Press, Cambridge UK. 537 p.
- Sakai, A., et W. Larcher 1987. Frost survival of plants. Responses and adaptation to freezing stress. *Ecological studies* Vol. 62, Springer-Verlag, New York. 321 p.
- Salonius, P., K. Beaton, et B. Roze 2000. Effects of cell size and spacing on root density and field performance of container-reared black spruce. Information Report M-X-208E. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Atlantic Forestry Center, Fredericton, NB. 21 p.
- SAS Institute Inc. 2009. JMP® 8, Statistics and Graphics Guide, Second Edition. Cary, NC: SAS Institute Inc. 1230 p.
- Saucier, J.-P., P. Grondin, A. Robitaille, J. Gosselin, C. Morneau, P. J.H. Richard, J. Brisson, L. Sirois, A. Leduc, H. Morin, É. Thiffault, S. Gauthier, C. Lavoie et S. Payette 2009. Écologie forestière. *Dans* ORDRE DES INGÉNIEURS FORESTIERS DU QUÉBEC, Manuel de foresterie, 2ième éd. Ouvrage collectif. Éditions Multimonde. Québec : p. 165-316.
- Scarrat, J.B. 1982. Container stock specifications for northern Ontario. *Dans* J.B. Scarrat, C. Glerum et C.A. Plexam (éditeurs). *Proceedings of the Canadian Containerized Tree Seedling Symposium*, sept. 14-16, 1981, Toronto, Ontario. pp. 343-354. Can. For. Serv. Great Lakes For. Res. Centre. Sault Ste. Marie, ON.
- Sit, V. 1995. Analyzing ANOVA design. Biometrics information handbook no. 5. Prov. British-Columbia. Min. of Forest Research Program. 61 p.
- Sokal, R.R. et F.J. Rohlf 1991. *Biometry*. Second Edition. Freeman, New York. 837 p.
- Sutherland, D.C. et R.J. Day 1988. Container volume affects survival and growth of white spruce, black spruce, and jack pine seedlings: a literature review. *NJAF* 5 : 185-189.
- Sutinen, M.L., R. Arora, M. Wisniewski, E. Ashworth, R. Strimbeck et J. Palta 2001. *Dans* F.J. Bigras et S.J. Colombo (éditeurs). *Conifer cold hardiness* pp. 89-120. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.
- Sutton, R.F. 1982. Plantation establishment in boreal forest: planting season extension. *Can. For. Serv. Great Lakes For. Cent. Inf. Rep. O-X-344*. 141 p.
- Swan, H.S.D. 1970. Relationship between nutrient supply, growth and nutrient concentrations in the foliage of black spruce and jack pine. *Woodland Pap. Pulp Res. Inst. Can. No. 19*. 46 p.
- Tan, W. 2007. Impacts of nursery cultural treatments on stress tolerance in 1 + 0 container white spruce (*Picea glauca* [Moench] Voss) seedlings for summer-planting. *New For.* 33: 93-107.
- Tan, W., S. Blanton et J.P. Bielech 2008. Summer planting performance of white spruce 1 + 0 container seedlings affected by nursery short-day treatment.

New For. 35: 187-205.

Thiffault, N., V. Roy, G. Prigent, G. Cyr, R Jobidon et J. Ménétrier 2003. La sylviculture des plantations résineuses au Québec. Nat. Can. 127: 63-80.

Titus, B.D., S.S. Sidhu et A.U. Mallik 1995. A summary of some studies on *Kalmia angustifolia* L.: a problem species in Newfoundland forestry. Can. For. Serv. Inf. Rep. N-X-296. 68 p.

Trottier, F. 1998. Performance des plantations établies par le ministère des Ressources naturelles, dans les forêts publiques du Québec, de 1986 et 1985. Ministère des Ressources naturelles, Ste-Foy, (Québec). 124 p.

Walsh, D., Allaire, J., et D. Lord 2002. Performance en plantation de plants d'épinette noire de petites dimensions : rapport d'étape pour la période 2001-2002. Université du Québec à Chicoutimi. [<http://dsf.uqac.ca/boreale/fichiers%20PDF/rap2000.pdf>]

Yamasaki, S.H., J.W. Fyles, K.N. Egger et B.D. Titus 1998. The effect of *Kalmia angustifolia* on the growth, nutrition, and ectomycorrhizal symbiont community of black spruce. For. Ecol. Manage. 105: 197-207.

Yamasaki, S.H., J.W. Fyles et B.D. Titus 2002. Interactions among *Kalmia angustifolia*, soil characteristics, and the growth and nutrition of black spruce seedlings in two boreal Newfoundland plantations of contrasting fertility. Can. J. For. Res. 32: 2215-2224.

